不同铜源及铜水平对育成期蓝狐生长性能、营养物质消化率及血清指标的影响

刘　志[1]　孙皓然[2]　吴学壮[3]　张铁涛[2]　郭俊刚[1]　崔　虎[1]　王中成[1]　乜　豪[1]　邢秀梅[2]　杨福合[2]　高秀华[1*]

(1.中国农业科学院饲料研究所，农业部饲料生物技术重点实验室，北京　100081；2.中国农业科学院特产研究所，长春　130123；3.安徽科技学院动物科学学院，蚌埠　233003）

摘　要：本试验旨在研究饲粮中不同铜源及铜水平对育成期蓝狐生长性能、营养物质消化率及血清指标的影响。试验选择 55 日龄健康蓝狐 100 只，随机分成 5 个组，每组 20 个重复，每个重复 1 只蓝狐。5 组蓝狐分别饲喂在基础饲粮添加 0、50、100 mg/kg（以铜计）的五水硫酸铜（$CuSO_4 \bullet 5H_2O$）或蛋氨酸铜（Met-Cu）的试验饲粮，2 种铜源共用 0 添加组为对照组。预试期为 7 d，正试期为 60 d。结果表明：1）饲粮铜水平对育成期蓝狐平均日增重有极显著影响（$P<0.01$），对育成期蓝狐料重比有显著影响（$P<0.05$）。饲粮铜源对育成期蓝狐平均日采食量、平均日增重和料重比均无显著影响（$P>0.05$）。2）饲粮铜水平对育成期蓝狐粗蛋白质消化率和粪铜含量有极显著影响（$P<0.01$），对干物质消化率、粗脂肪消化率有显著影响（$P<0.05$）。饲粮铜源对育成期蓝狐粪铜含量有显著影响（$P<0.05$），蛋氨酸铜组的粪铜含量显著低于硫酸铜组($P<0.05$)；饲粮铜源对育成期蓝狐干物质消化率、粗脂肪消化率、粗蛋白质消化率和氮沉积均无显著影响（$P>0.05$）。3）饲粮铜源及铜水平对育成期蓝狐血清尿素氮含量有极显著影响（$P<0.01$），50、100 mg/kg 铜添加组的血清尿素氮含量极显著高于对照组（$P<0.01$），蛋氨酸铜组的血清尿素氮含量极显著高于硫酸铜组($P<0.01$)。饲粮铜源及铜水平对育成期蓝狐血清总蛋白、白蛋白、球蛋白、铜、铁含量及天冬氨酸转氨酶、丙氨酸转氨酶活性均无显著影响（$P>0.05$）。由此可见，育成期蓝狐的饲粮中添加蛋氨酸铜可以获得与硫酸铜相似的促生长效果，此外，蛋氨酸铜的利用率更高，环境排放低，是蓝狐饲粮更高效、更环保的有机铜源。

关键词：铜源；铜水平；育成期；生长性能；蓝狐

中图分类号：S865.2+3　　　　文献标识码：　　　　文章编号：

收稿日期：2018-01-03
基金项目：国家自然资源平台专项“特种经济动物种质资源共享平台”
作者简介：刘　志（1988—），男，山东青岛人，博士研究生，从事特种经济动物营养研究。E-mail：　liuzhicaas@126.com
*通信作者：高秀华，研究员，博士生导师，E-mail：　xiuhuagao@126.com

铜是动物必需的微量元素之一，具有维持铁的正常代谢、促进骨骼的发育、参与细胞内能量代谢等诸多生理作用，动物长期缺铜会导致生长受阻、骨骼发育异常以及共济失调等症状，严重影响动物的生长性能和经济价值[1]。目前硫酸铜（$CuSO_4$）是配制动物饲粮时最常用到的铜源，具有补铜效果良好、价格便宜、容易获得等特点，因此被生产中广泛使用。此外在断奶仔猪上研究表明，饲粮中添加一定水平（125~250 mg/kg）的硫酸铜对于仔猪有显著的促进生长作用[2]。前期对育成期蓝狐的研究表明，饲粮中铜水平为 40 mg/kg（铜源为硫酸铜）时可提高育成期蓝狐的生长速度和饲料转化率[3]。然而硫酸铜在实际使用过程仍存在许多问题，研究表明动物对无机铜的利用率较低，饲粮中大部分的硫酸铜并未被机体利用，经由粪便排出体外，这不仅造成铜的浪费，更会对环境产生重金属污染[4]。此外，高铜会降低饲粮中其他金属元素如锌、铁的吸收，加速饲粮中的抗氧化物质和油脂的氧化变质[5]。有机铜具有生物学利用率高、适口性好、矿物质元素间拮抗小、对饲料中的还原性物质破坏小等特点[6]，使用有机铜替代硫酸铜可有效提高铜的利用率，降低铜的排放，在环保压力日益增大的背景下，有机铜的优势更加明显，因此有机铜已经逐渐被越来越多饲料生产者认可和采用。蛋氨酸铜（Met-Cu）是蛋氨酸与铜的螯合产物，可以通过氨基酸胞饮的方式被机体吸收，缓解微量元素之间竞争性拮抗作用，大大提高铜离子的吸收利用率，并能够降低铜对饲料中还原性物质如维生素 C、硒等的破坏和油脂的氧化酸败[7]。邓伏清等[8]将蛋氨酸铜与硫酸铜的效果进行比较发现，仔猪对蛋氨酸铜的利用率较高。吴学壮[9]比较了水貂对硫酸铜、蛋氨酸铜和碱式氯化铜 3 种铜源的生物学利用率，结果表明育成期阶段蛋氨酸铜相较于硫酸铜的生物学利用率为 124.35%。目前不同铜源生物学利用率的研究主要集中在猪和禽类，蓝狐对有机铜的利用情况尚未开展系统研究。因此，本试验以蛋氨酸铜作为有机铜的代表，研究蛋氨酸铜和硫酸铜对育成期蓝狐生长性能、营养物质消化率及血清指标的影响，为有机铜在蓝狐生产实践科学应用提供理论指导。

1　材料与方法

1.1　试验饲粮

鉴于蓝狐目前还没有统一的营养需要量标准，本研究参照 NRC[10]蓝狐营养需要量标准及近年来国内外蓝狐营养的相关文献报道[11-13]，设计出育成期蓝狐的基础饲粮，基础饲粮组成及营养水平见表 1。经实测基础饲粮铜含量为 14.44 mg/kg 干物质（DM）。试验饲粮由基础饲粮额外添加 0、50、100 mg/kg（以铜计）的五水硫酸铜（$CuSO_4 \cdot 5H_2O$）或蛋氨酸铜配制而成。由于蛋氨酸铜在添加铜的同时会引入不同剂量的蛋氨酸，这会导致各组试验饲粮蛋氨酸含量出现差异，因此本试验以“蛋氨酸铜最高组”中引入的蛋氨酸量为基准，其他各组中

补充额外的蛋氨酸到此水平，以维持各试验饲粮蛋氨酸水平一致性。

表 1　基础饲粮组成及营水平表（风干基础）

Table 1　Composition and nutrient levels of the basal diet (air-dry basis)　　%

原料 Ingredients	含量 Content	营养水平 Nutrient levels[2]	含量 Content
膨化玉米 Extruded corn	36.3	代谢能 ME/(MJ/kg)	14.71
膨化大豆 Extruded soybean	16.0	粗蛋白质 CP	31.86
玉米蛋白粉 Corn gluten meal	6.0	粗脂肪 EE	11.35
鱼粉 Fish meal	15.0	赖氨酸 Lys	1.76
肉骨粉 Meat and bone meal	17.0	蛋氨酸 Met	0.76
乳酪粉 Cheese meal	2.0	半胱氨酸 Cys	0.61
豆油 Soybean oil	6.0	钙 Ca	2.23
预混料 Premix[1]	1.0	总磷 TP	1.41
赖氨酸 Lys	0.3	铜 Cu/（mg/kg）	14.44
蛋氨酸 Met	0.2	锌 Zn/（mg/kg）	128.04
食盐 NaCl	0.2	铁 Fe/（mg/kg）	454.67
合计 Total	100.0	锰 Mn/（mg/kg）	10.23

[1]每千克预混料含有 Contained the following per kg of the premix：VA 1 000 000 IU，VD_3 200 000 IU，VE 6 000 IU，VB_1 6 00 mg，VB_2 800 mg，VB_6 10 mg，VK_3 100 mg，VC 40 000 mg，烟酸 niacin acid 4 000 mg，泛酸 folic acid 80 mg，胆碱 choline 30 000 mg，Fe 8 200 mg，Mn 1 200 mg，I 50 mg，Se 20 mg，Co 50 mg。

[2]粗蛋白质、粗脂肪、钙、铜、锌、总磷为测定值，其他为计算值。CP, EE, Ca, Cu, Zn and TP were measured values, while the others were calculated values.

1.2　试验设计与饲养管理

试验选择 (55±5)日龄健康蓝狐 100 只，随机分成 5 个组，每个组 20 个重复（公母各 10 只），每个重复 1 只蓝狐。5 组蓝狐分别饲喂在基础饲粮中添加 0、50 或 100 mg/kg 的五水硫酸铜或蛋氨酸铜的试验饲粮，2 种铜源共用 0 添加组为对照组。预试期为 7 d，正试期为 60 d。试验蓝狐均为单笼(105 cm×80 cm×70 cm)饲养，试验开始前，对蓝狐进行常规免疫接种，每日 08:00 与 15:00 各饲喂 1 次，自由采食，自由饮水，每日记录实际采食量。

1.3　消化代谢试验

正式试验期开始后 30 d，每组随机挑选 8 只健康蓝狐进行为期 5 d 的消化代谢试验。试

验采用全收粪法，采用粪尿可分离式接粪盘收集蓝狐每日的粪便及尿液。代谢试验期间饲养管理与日常饲养管理完全相同。每天收集饲料样品、粪便和尿液并详细记录每只蓝狐的采食量与剩料量，粪便称重后按鲜重的 5%加入 10%的硫酸溶液，并加入少量甲苯防腐，于-20 ℃保存备用；尿液按每 100 mL 加入 10 mL 10%硫酸溶液，滴加 4 滴甲苯防腐，于-20 ℃保存备用。

1.4　测定指标及方法

1.4.1　生长性能

试验正试期开始第 1 天早晨对蓝狐进行空腹称重，为试验动物的初重，以后每隔 15 d 称重 1 次，记录蓝狐的体重，并计算出蓝狐的平均日增重和料重比。记录每只蓝狐每天的给料量和剩料量，计算蓝狐的平均日采食量。

1.4.2　营养物质消化率

饲粮及粪便中的干物质含量采用 65 ℃烘干法测定，参照 GB/T 6435-2006；粗蛋白质含量采用凯氏定氮法测定，参照 GB/T 6432-1994；粗脂肪含量采用索氏抽提法测定，参照 GB/T 6433-2006。采用火焰原子吸收法（GB/T 13885-2003）测定饲粮、肝脏及排泄物中铜的含量。

干物质消化率（%）=[（干物质采食量-干物质排出量）/干物质采食量]×100；

粗蛋白质消化率（%）=[(粗蛋白质摄入量-粪中粗蛋白质含量)/粗蛋白质摄入量]×100；

粗脂肪消化率（%）=[（粗脂肪摄入量-粪中粗脂肪含量）/粗脂肪摄入量]×100；

氮沉积（g/d）=食入氮-粪氮-尿氮。

1.4.5　血清指标

采用日立 7020 型全自动生化分析仪测定血清中总蛋白（TP）、白蛋白（ALB）、球蛋白（GLO）、尿素氮（UN）、铜（Cu）、铁（Fe）含量及天冬氨酸转氨酶（AST）、丙氨酸转氨酶（ALT）活性，试剂盒购自中生北控生物科技股份有限公司，测定过程严格参照试剂盒说明书。采用紫外/可见光分光光度计（德国耶拿）测定血清铜蓝蛋白（Cp）、铜锌超氧化物歧化酶（Cu-Zn SOD）活性，试剂盒购自南京建成生物工程研究所，测定过程严格参照试剂盒说明书。

1.5　数据处理与统计分析

试验数据以平均值±标准差表示。采用 SAS 9.1.3 软件 GLM 程序进行数据分析，以铜源、铜水平以及铜源及铜水平的互作效应进行 2×3 双因素方差分析（two-way ANOVA）。模型如

下：

$$Y_{ijk}=\mu+A_i+B_j+(AB)_{ij}+\varepsilon_{ijk}。$$

式中：Y_{ijk}是观测值；μ是平均值；A_i是铜源的主效应；B_j是铜水平的主效应；$(AB)_{ij}$是铜源与铜水平的交互作用；ε_{ijk}是随机误差。对差异显著主效应进行 Duncan 氏法多重比较，检验差异显著性，铜源及铜水平互作效应显著时采用 LSMEANS 程序 PDIFF 方法进行显著性分析。

2 结 果

2.1 不同铜源及铜水平对育成期蓝狐生长性能的影响

不同铜源及铜水平对育成期蓝狐生长性能的影响见表 2。由表可知，饲粮铜水平对育成期蓝狐平均日增重有极显著影响（P<0.01），50、100 mg/kg 铜添加组平均日增重显著高于对照组（P<0.05）；饲粮铜水平对育成期蓝狐料重比有显著影响（P<0.05），50、100 mg/kg 铜添加组料重比显著低于对照组（P<0.05）。饲粮铜源对育成期蓝狐平均日采食量、平均日增重和料重比均无显著影响（P>0.05）。各组育成期蓝狐的平均日采食量、平均日增重和料重比均未观测到铜源及铜水平的互作效应（P>0.05）。

表 2 不同铜源及铜水平对育成期蓝狐生长性能的影响

Table 2 Effects of different Cu sources and levels on growth performance of growing blue foxes

项目 Items		初重 IW/kg	末重 FW/kg	平均日增重 ADG/g	平均日采食量 ADFI/g	料重比 F/G
组别 Groups	对照 Control	2.33	5.26	52.39	237.85	4.56
	50 mg/kg 硫酸铜 50 mg/kg $CuSO_4$	2.33	5.39	54.58	239.94	4.41
	100 mg/kg 硫酸铜 100 mg/kg $CuSO_4$	2.34	5.41	54.74	239.90	4.39
	50 mg/kg 蛋氨酸铜 50 mg/kg Met-Cu	2.36	5.43	54.87	239.90	4.38
	100 mg/kg 蛋氨酸铜 100 mg/kg Met-Cu	2.35	5.45	55.30	239.80	4.35
SEM		0.05	0.04	0.38	3.45	0.03

主效应 Main effect						
铜源 Cu source	硫酸铜 $CuSO_4$	2.34	5.35	53.70	239.23	4.45
	蛋氨酸铜 Met-Cu	2.33	5.38	54.38	239.18	4.43
铜水平 Cu level/(mg/kg)	0	2.33	5.26	52.39^{b}	237.85	4.56^{a}
	50	2.35	5.41	54.72^{a}	239.9	4.39^{b}
	100	2.35	5.43	55.02^{a}	239.8	4.37^{b}
P 值 *P*-value	铜源 Cu source	0.91	0.74	0.66	0.84	0.69
	铜水平 Cu level	0.98	0.16	＜0.01	0.61	0.01
	铜源×铜水平 Cu source×Cu level	1.00	0.97	0.94	0.77	0.96

同列数据肩标不同小写字母表示差异显著（*P*<0.05），不同大写字母表示差异极显著（*P*<0.01），相同或无字母表示差异不显著（*P*>0.05）。下表同。

In the same column, values with different small letter superscripts mean significant difference (*P*<0.05), and with different capital letter superscripts mean significant difference (*P*<0.01), while with the same or no letter superscripts mean no significant difference (*P*>0.05). The same as below.

2.2　不同铜源及铜水平对育成期蓝狐营养物质消化率的影响

不同铜源及铜水平对育成期蓝狐营养物质消化率的影响见表 3。由表可知，饲粮铜水平对育成期蓝狐粗蛋白质消化率和粪铜含量有极显著影响（*P*<0.01），对干物质消化率、粗脂肪消化率有显著影响（*P*<0.05），100 mg/kg 铜添加组干物质消化率、粗蛋白质消化率显著高于对照组（*P*<0.05），50、100 mg/kg 铜添加组粗脂肪消化率、粪铜含量显著高于对照组（*P*<0.05）。饲粮铜源对育成期蓝狐粪铜含量有显著影响（*P*<0.05），蛋氨酸铜组的粪铜含量显著低于硫酸铜组(*P*<0.05)；饲粮铜源对育成期蓝狐干物质消化率、粗脂肪消化率、粗蛋白质消化率和氮沉积均无显著影响（*P*>0.05）。各组育成期蓝狐的干物质消化率、粗脂肪消化率、粗蛋白质消化率、氮沉积和粪铜含量均未观测到铜源与铜水平的互作效应（*P*>0.05）。

表 3　不同铜源及铜水平对育成期蓝狐营养物质消化率的影响

Table 3　Effects of different Cu sources and levels on nutrient digestibility of growing blue foxes

项目 Items		干物质消化率 DM	粗蛋白质消化率 CP	粗脂肪消化率 EE	氮沉积 Nitrogen	粪铜 Fecal copper/(mg/kg

		digestibility/%	digestibility/%	digestibility/%	retention/(g/d)	)
组别 Groups	对照 Control	66.87	68.98	80.21	3.19	26.14
	50 mg/kg 硫酸铜 50 mg/kg $CuSO_4$	67.51	69.20	81.51	3.28	158.44
	100 mg/kg 硫酸铜 100 mg/kg $CuSO_4$	68.39	71.11	82.49	3.53	270.24
	50 mg/kg 蛋氨酸铜 50 mg/kg Met-Cu	67.43	69.98	82.44	3.31	142.16
	100 mg/kg 蛋氨酸铜 100 mg/kg Met-Cu	69.95	72.82	82.13	3.64	251.40
SEM		0.38	0.42	0.39	0.21	15.46
主效应 Main effect						
铜源 Cu source	硫酸铜 $CuSO_4$	67.59	69.76	81.40	3.34	151.61[a]
	蛋氨酸铜	68.69	71.40	82.28	3.48	140.00[b]

	Met-Cu					
铜水平 Cu level/(mg/kg)	0	66.87[b]	68.98[b]	80.21[b]	3.19	26.14[c]
	50	67.47[b]	69.59[b]	81.97[a]	3.30	150.31[b]
	100	69.17[a]	71.97[a]	82.31[a]	3.59	260.82[a]
P 值 *P*-value	铜源 Cu source	0.46	0.23	0.54	0.77	0.02
	铜水平 Cu level	0.02	＜0.01	0.04	0.14	＜0.01
	铜源×铜水平 Cu source×Cu level	0.53	0.60	0.32	0.52	0.18

2.3　不同铜源及铜水平对育成期蓝狐血清指标的影响

不同铜源及铜水平对育成期蓝狐血清指标的影响见表 4 和表 5。由表 4 可知，饲粮铜水平对育成期蓝狐血清 UN 含量有极显著影响（$P<0.01$），50、100 mg/kg 铜添加组的血清 UN 含量极显著高于对照组（$P<0.01$）。饲粮铜源对育成期蓝狐血清 UN 含量有极显著影响（$P<0.01$），蛋氨酸铜组的血清 UN 含量极显著高于硫酸铜组($P<0.01$)。饲粮铜源及铜水平对育成期蓝狐血清 TP、ALB、GLO、Cu、Fe 含量及 ALT、AST 活性均无显著影响（$P>0.05$）。各组育成期蓝狐的血清 TP、ALB、GLO、UN、Cu、Fe 含量及 ALT、AST 活性均未观测到铜源与铜水平的互作效应（$P>0.05$）。

表 4　铜源及铜水平对育成期蓝狐血清生化指标的影响

Table 4　Effects of different Cu sources and levels on serum biochemical indices of growing blue foxes

项目 Items		丙氨酸转氨酶 ALT/（U/L）	天冬氨酸转氨酶 AST/（U/L）	总蛋白 TP/（g/L）	白蛋白 ALB/（g/L）	球蛋白 GLO/（g/L）	尿素氮 UN/（mmol/L）	铜 Cu/（μmol/L）	铁 Fe/（μmol/L）
组别 Groups	对照 Control	129.39	33.63	58.19	29.18	29.01	7.49	13.34	37.37
	50 mg/kg 硫酸铜	106.81	34.50	57.48	27.51	29.98	10.24	12.56	47.94

	50 mg/kg $CuSO_4$								
	100 mg/kg 硫酸铜 100 mg/kg $CuSO_4$	125.03	33.87	59.84	28.49	31.35	10.57	13.61	39.40
	50 mg/kg 蛋氨酸铜 50 mg/kg Met-Cu	107.15	37.48	59.79	26.63	33.16	18.86	13.76	41.39
	100 mg/kg 蛋氨酸铜 100 mg/kg Met-Cu	143.84	37.03	62.56	29.79	32.78	16.21	13.77	49.78
SEM		10.72	0.93	0.71	0.45	0.64	1.04	0.33	1.70
主效应 Main effect									
铜源 Cu source	硫酸铜 $CuSO_4$	120.41	34.00	58.50	28.39	30.11	9.43^{Bb}	13.17	41.57
	蛋氨酸铜 Met-Cu	126.79	36.05	60.18	28.53	31.65	14.19^{Aa}	13.62	42.84
铜水平 Cu level/(mg/kg)	0	129.39	33.63	58.19	29.18	29.01	7.49^{Bb}	13.34	37.37
	50	106.98	35.99	58.64	27.07	31.57	14.55^{Aa}	13.16	44.66
	100	134.43	35.45	61.20	29.14	32.06	13.39^{Aa}	13.69	44.59
P 值 *P*-value	铜源 Cu source	0.77	0.29	0.54	0.87	0.22	＜0.01	0.51	0.69
	铜水平 Cu level	0.56	0.57	0.18	0.09	0.11	＜0.01	0.82	0.08
	铜源×铜水平 Cu source×Cu level	0.92	0.75	0.63	0.61	0.57	0.13	0.74	0.11

由表 5 可知，饲粮铜源及铜水平对育成期蓝狐血清 Cp 和 Cu-Zn SOD 活性均无显著影响（$P>0.05$）。各组育成期蓝狐的血清 Cp 和 Cu-Zn SOD 活性均未观测到铜源与铜水平的互作效应（$P>0.05$）。

表 5　铜源及铜水平对育成期蓝狐血清 Cp 和 Cu-Zn SOD 活性的影响

Table 5　Effects of different Cu sources and levels on activities of Cp and Cu-Zn SOD in serum of growing blue foxes

项目 Items		铜蓝蛋白 Cp/（U/L）	铜锌超氧化物歧化酶 Cu-Zn SOD/（U/mL）
组别 Groups	对照 Control	19.11	33.46

	50 mg/kg 硫酸铜 50 mg/kg $CuSO_4$	19.88	34.31
	100 mg/kg 硫酸铜 100 mg/kg $CuSO_4$	20.49	34.92
	50 mg/kg 蛋氨酸铜 50 mg/kg Met-Cu	20.20	33.87
	100 mg/kg 蛋氨酸铜 100 mg/kg Met-Cu	21.12	34.63
SEM		0.34	1.08
主效应 Main effect			
铜源 Cu source	硫酸铜 $CuSO_4$	19.83	34.28
	蛋氨酸铜 Met-Cu	20.14	34.59
铜水平 Cu level/(mg/kg)	0	19.11^{b}	33.46
	50	20.04^{ab}	34.13
	100	20.81^{a}	34.72
P 值 *P*-value	铜源 Cu source	0.60	0.73
	铜水平 Cu level	0.08	0.35
	铜源×铜水平 Cu source×Cu level	0.91	0.44

3 讨 论

3.1 不同铜源及铜水平对育成期蓝狐生长性能的影响

研究表明，饲粮中添加适量铜对幼龄单胃动物如断奶仔猪等有明显的促生长效果。在本试验中，饲粮中添加外源铜提高了育成期蓝狐的生长性能，这与刘志等[3]对育成蓝狐的研究结果一致。白玉妍等[14]对乌苏里貉的研究表明，饲粮中使用蛋氨酸铜作为铜源能够提高貉的生长速度，增加体长。李道林[15]研究表明，高剂量铜（40~80 mg/kg）对獭兔有促生长效果，且添加蛋氨酸铜的效果明显优于硫酸铜。本研究发现，在相同添加水平下蛋氨酸铜的促生长效果略好于硫酸铜，这与上述报道一致。氨基酸铜是氨基酸与铜的螯合反应产物，它可以通过氨基酸胞饮的方式被机体吸收，缓解微量元素之间竞争性拮抗作用，提高铜离子的吸收利用率，并能够降低铜离子对饲料中维生素的氧化破坏和油脂的酸败。铜对蓝狐的促生长机理目前尚不清楚，推测可能与消化酶活性的提高和生长相关激素分泌增多等有关。杜冰[16]研究

表明，适宜的铜离子浓度能提高机体多种消化酶的活性，进而提高饲料中营养物质的吸收率。Luo 等[17]的研究证明，高铜可以提高断奶仔猪脂肪酶的活性。毛皮动物饲粮的一个重要特点是富含高油脂，因此铜对脂肪消化率的提升在蓝狐饲粮所起的效果更加突出。罗绪刚等[18]报道，铜能通过促进垂体生长激素的基因表达而促进幼猪的生长，甘氨酸铜比硫酸铜更有效地提高了断奶仔猪垂体生长激素 mRNA 的合成。高铜饲粮对育成期蓝狐生长相关激素水平的影响目前尚不清楚，需要进一步研究验证。

3.2　不同铜源及铜水平对饲粮营养物质消化率的影响

研究表明，高剂量铜可以通过改善肠黏膜形态、提高消化酶活性以及改善肠道内菌群结构提高机体对饲粮中营养物质的利用[19]。Radecki 等[20]研究表明，高铜可以通过使空肠变薄、十二指肠绒毛变短、减缓空肠等组织更新速度从而降低了它们维持的能量需要，相应地增加了用于生产的能量。Shurson 等[21]报道，饲粮中添加高铜能够增加小肠隐窝的深度。Dove[22]研究发现，仔猪饲粮中添加高铜能够显著提高干物质、蛋白质以及脂肪等营养物质的消化率。Luo 等[17]进一步研究揭示了高铜对消化酶的影响，高铜能够促进消化道内肠脂肪酶和磷脂酶 A 的活性，此外铜的体外试验还证实了高铜能够提高胰脂肪酶的活性。吴学壮[9]报道饲粮中添加铜能够促进水貂胆汁的分泌，饲粮中脂肪得到更充分的乳化，进而提高了饲粮脂肪的消化率。Kirchgessner 等[23]报道，适宜的铜离子浓度可以激活胃蛋白酶原，提高胃蛋白酶活性，促进食物蛋白质的分解和吸收。高铜能够提高仔猪血液中胃泌素的水平，胃泌素能刺激盐酸、胰液和胆汁的分泌，此外还能刺激主细胞分泌胃蛋白酶原，促进蛋白质的消化。本研究中，随着饲粮铜水平的升高，干物质、粗蛋白质和粗脂肪的消化率显著提升，出现这种情况的原因可能是铜的添加提高了消化酶活性并改善了肠黏膜的形态结构，使得饲粮中营养物质更容易被吸收。Turnlund 等[24]采用同位素失踪法研究饲粮铜水平与机体吸收率的关系，结果表明随着饲粮铜水平的升高，铜的吸收率逐渐降低。本研究中发现，饲喂高铜饲粮的蓝狐粪铜含量极显著高于饲喂低铜饲粮的蓝狐。蛋氨酸铜可以通过氨基酸的胞吞方式被机体吸收，因此机体蛋氨酸铜的吸收率要高于硫酸铜。在铜添加水平一致的情况下，添加蛋氨酸铜的蓝狐粪铜含量更低。

3.3　不同铜源及铜水平对育成期蓝狐血清生化指标的影响

血清 ALT 和 AST 是检测人和动物肝功能的重要指标，研究表明高铜会造成动物肝脏损伤，肝细胞被破坏，致使血清 AST 和 ALT 活性升高[25-26]。本试验表明，饲粮中添加 100 mg Cu/kg 的硫酸铜或蛋氨酸铜均为未引起蓝狐肝脏的明显损伤。血清蛋白是维持机体渗透压和保持水平衡的重要物质，主要由 ALB 和 GLO 组成。ALB 在机体铜的转运过程中发挥着重

要作用，由肠道吸收进入门静脉的铜离子会与先于血清中的 ALB 或组蛋白结合，经血液循环最终到达肝脏。随着饲粮铜水平的升高，被肠道吸收的铜离子会随之增多，这就需要更多的 ALB 来负责转运，这可能是血清 ALB 随饲粮铜水平升高有升高趋势的原因。李道林[15]研究发现，獭兔血清 UN 含量会随着饲粮中铜水平的升高而降低，这与本试验的结果并不一致，差异的来源可能是蓝狐与獭兔不同的生理特性造成的。动物血浆中铜的含量受到的机体严格调控，然而当体内铜的含量超过调控范围后，血浆中铜的含量会明显升高，严重时会产生高铜血症[27]。铜可以提高铁的利用，因此蓝狐血清铁的含量会随着饲粮铜水平的升高有增大的趋势。

3.4　不同铜源及铜水平对育成期蓝狐血清 Cp 和 Cu-Zn SOD 活性的影响

Cu-Zn SOD 和 Cp 是动物机体 2 种重要的含铜酶，在机体起至关重要的氧化作用，可以有效保护机体，抵御由自由基引起氧化应激。Feng 等[28]研究发现，断奶仔猪饲粮添加 250 mgkg 硫酸铜和 100 mg/kg 蛋白铜能够提高血清 Cp 的活性，此外添加 100 mg/kg 蛋白铜还能提高红细胞内 Cu-Zn SOD 的活性。吴学壮[9]对水貂的研究发现，饲粮添加铜能够提高血清 Cp 和 Cu-Zn SOD 的活性。本研究中，虽然血清 Cu-Zn SOD 的活性各组间差异不显著，但是血清 Cp 的活性随着饲粮铜水平的升高而升高，这与水貂和猪上的研究一致。

4　结　论

育成期蓝狐在 14.44 mg/kg 铜的基础饲粮中再添加 50 mg/kg 蛋氨酸铜或者硫酸铜均能获得较好的促生长效果，此外蛋氨酸铜可以显著降低粪铜的排放，是一种更高效、环保的铜源。

参考文献：

[1] NRC.Mineral tolerance of animals[M].2nd rev ed.Washington,D.C.:National Academy Press,2005.

[2] CROMWELL G L,STAHLY T S,MONEGUE H J.Effects of source and level of copper on performance and liver copper stores in weanling pigs[J].Journal of Animal Science,1989,67(11):2996–3002.

[3] 刘志,张铁涛,郭强,等.饲粮铜水平对育成期蓝狐生长性能、营养物质消化率及氮代谢的影响[J].动物营养学报,2013,25(7):1497–1503.

[4] 段有刚,施杏芬,朱五文,等.猪饲料中添加高铜的危害及控制对策[J].畜牧兽医科技信息,2006(8):91–92.

[5] 徐运杰,方热军.养猪业中高铜的应用及其危害[J].饲料博览（技术版）,2008(4):27–30.

[6] 晏家友.有机铜在养猪生产中的研究应用[J].猪业科学,2011,28(3):72–73.

[7] 何河,方热军,高凤仙,等.蛋氨酸铜对猪血清铜锌含量及粪铜锌排泄量的影响[J].家畜生态学报,2008,29(3):44–47.

[8] 邓伏清,廖阳华,王勇,等.不同铜源对生长肥育猪生产性能的影响[J].饲料研究,2012(2):42–44.

[9] 吴学壮.水貂饲粮适宜铜源及铜水平研究[D].博士学位论文.北京:中国农业科学院,2015.

[10] NRC.Nutrient requirements of mink and foxes[M].2nd rev ed.Washington,D.C.:National Academy Press,1982.

[11] 耿业业.育成期蓝狐脂肪消化代谢规律的研究[D].博士学位论文.北京:中国农业科学院,2011.

[12] 崔虎.日粮蛋白质和蛋氨酸水平对蓝狐生产性能及营养物质代谢的影响[D].硕士学位论文.北京:中国农业科学院,2012.

[13] 郭永佳,佟煜人.养狐实用新技术[M].北京:金盾出版社,2008.

[14] 白玉妍,张浩,叶纯子,等.蛋氨酸铜、蛋氨酸锌对乌苏里貉冬毛生长期体重及毛皮质量的影响[J].黑龙江畜牧兽医,2009(13):113–114.

[15] 李道林.铜源和铜水平对生长獭兔的生长性能、毛皮品质及理化指标的影响[D].硕士学位论文.长春:中国人民解放军军需大学,2002.

[16] 杜冰.添加高剂量铜和锌对断奶仔猪生产性能、养分消化率和酶活性的影响[D].硕士学位论文.南京:南京农业大学,2010.

[17] LUO X G,DOVE C R.Effect of dietary copper and fat on nutrient utilization,digestive enzyme activities,and tissue mineral levels in weanling pigs[J].Journal of Animal Science,1996,74(8):1888–1896.

[18] 罗绪刚,邝霞,李清宏,等.饲粮铜源和水平对断奶仔猪垂体生长激素 mRNA 水平的影响[C]//中国畜牧兽医学会动物营养学分会第六届全国会员代表大会暨第八届学术研讨会论文集.哈尔滨:黑龙江人民出版社,2000:710–711.

[19] 何河,方热军.高铜在猪生产中的应用及促生长机理研究进展[J].湖南饲料,2007(2):6–8.

[20] RADECKI S V,KU P K,BENNINK M R,et al.Effect of dietary copper on intestinal mucosa enzyme activity,morphology,and turnover rates in weanling pigs[J].Journal of Animal Science,1992,70(5):1424–31.

[21] SHURSON G C,KU P K,WAXLER G L,et al.Physiological relationships between

microbiological status and dietary copper levels in the pig[J].Journal of Animal Science,1990,68(4):1061–1071.

[22] DOVE C R.The effect of copper level on nutrient utilization of weanling pigs[J].Journal of Animal Science,1995,73(1):166–171.

[23] KIRCHGESSNER M,BEYER M G,STEINHART H.Activation of pepsin (EC 3.4.4.1) by heavy-metal ions including a contribution to the mode of action of copper sulphate in pig nutrition[J].The British Journal of Nutrition,1976,36(1):15–22.

[24] TURNLUND J R.Bioavailability of dietary minerals to humans:the stable isotope approach[J].Critical Reviews in Food Science and Nutrition,1991,30(4):387–396.

[25] HWANG D F,WANG L C,CHENG H M.Effect of taurine on toxicity of copper in rats[J].Food and Chemical Toxicology,1998,36(3):239–244.

[26] SUGAWARA N,LI D,SUGAWARA C,et al.Response of hepatic function to hepatic copper deposition in rats fed a diet containing copper[J].Biological Trace Element Research,1995,49(2/3):161–169.

[27] DANZEISEN R,ARAYA M,HARRISON B,et al.How reliable and robust are current biomarkers for copper status?[J].British Journal of Nutrition,2007,98(4):676–683.

[28] FENG J,MA W,GU Z,et al.Effects of dietary copper (Ⅱ) sulfate and copper proteinate on performance and blood indexes of copper status in growing pigs[J].Biological Trace Element Research,2007,120(1/2/3):171–178.

Effects of Different Copper Sources and Levels on Growth Performance, Nutrient Digestibility and Serum Biological Indices of Growing Blue Foxes

LIU Zhi[1] SUN Haoran[2] WU Xuezhuang[3] ZHANG Tietao[2] GUO Jungang[1] CUI Hu[1]

WANG Zhongcheng[1] NIE Hao[1] XING Xiumei[2] YANG Fuhe[2] GAO Xiuhua[1*]

(1. *Key Laboratory for Feed Biotechnology of Ministry of Agriculture, Institute of Feed Research, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing* 100081, *China;* 2. *Institute of Special Animal and Plant Sciences, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Changchun* 130123, *China;* 3.

*Corresponding author, professor, E-mail: xiuhuagao@126.com （责任编辑 武海龙）

College of Animal Science, Anhui Science and Technology University, Bengbu 233003, *China*）

Abstract: This experiment was conducted to investigate the effects of dietary different copper sources and levels on growth performance, nutrient digestibility and serum biological indices of growing blue foxes. One hundred 55-day-old blue foxes were selected and randomly divided into 5 groups with 20 replicates per group and 1 fox per replicate. Foxes were fed the basal diet supplemented with 0, 50 and 100 mg/kg copper from copper sulphate ($CuSO_4$•$5H_2O$) or copper methionine (Met-Cu), two copper sources shared the 0 supplemental group as the control group. The pre-experimental period lasted for 7 days and the formal experimental period lasted for 60 days. The results showed as follows: 1) dietary copper level had significant effect on the average daily gain of growing blue foxes (P<0.01), and had significant effect on the ratio of feed to gain of growing blue foxes (P<0.05). Dietary copper source had no significant effects on the average daily feed intake, average daily gain and ratio of feed to gain of growing blue foxes (P>0.05). 2) Dietary copper level had significant effects on the crude protein digestibility and fecal copper content of growing blue foxes (P<0.01), and had significant effects on the dry matter digestibility and ether extract digestibility of growing blue foxes (P<0.05). Dietary copper source had significant effect on the fecal copper content of growing blue foxes (P<0.05), and the fecal copper content in copper methionine group was significantly higher than that in copper sulphate group (P<0.05). Dietary copper source had no significant effects on the dry matter digestibility, ether extract digestibility, crude protein digestibility and nitrogen retention of growing blue foxes (P>0.05). 3) Dietary copper source and level had significant effect on the serum urea nitrogen content of growing blue foxes (P<0.01), the serum urea nitrogen content in 50 and 100 mg/kg copper supplemental group was significantly higher than that in control group (P<0.01), and the serum urea nitrogen content in copper methionine group was significantly higher than that in copper sulphate group (P<0.01). Dietary copper source and level had no significant effects on the contents of total protein, albumin, globulin, copper, iron and activities of aspartate aminotransferase and alanine aminotransferase in serum of growing blue foxes (P>0.05). In conclusion, copper methionine has a similar growth-promoting effect like copper sulphate in the diet of growing blue foxes. Furthermore, copper methionine is more effective and low environmental emission, which is a more efficient and environmentally organic copper source for

the diet of blue foxes.

Key word: copper source; copper level; growing period; growth performance; blue foxes